

Mechanical characterization of the shear resistance of mineral-bonded composites under impact loading

Mechanische Charakterisierung der Scherfestigkeit von mineralisch gebundenen Verbundwerkstoffen unter Schlagbelastung

An der Fakultät Bauingenieurwesen der Technischen Universität Dresden zur
Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
eingereichte

DISSERTATION

vorgelegt von
Ahmed Tawfik, M.Sc.
aus Giza (Ägypten)

eingereicht am 04. Oktober 2023

Tag der mündlichen Prüfung: 13. Mai 2024

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Viktor Mechtcherine

Prof. Dr. Ezio Cadoni

Prof. Dr. Amos Gilat

Abstract

Novel mineral-bonded composites such as strain hardening cement-based composites (SHCC) and textile-reinforced concrete (TRC) are promising solutions for strengthening existing buildings and designing new structures to resist impact loading. Under uniaxial tensile loading, these composites possess high strain capacity and energy absorption capability. SHCC and TRC exhibit a pronounced strain hardening behavior characterized by multiple cracking owing to the bridging capacity of the short fibers or continuous textiles, making them suitable for application as protective layers for existing structure and greatly increase the resilience and the impact safety of the built environment. Furthermore, mineral-bonded composites offer attractive pathways for enhanced sustainability standards, using e.g. alternative viable binders such as limestone calcined clay LC³.

As structural elements and strengthening layers are subjected to a manifold of concurrent local and global loading conditions during impact, the comprehensive characterization of SHCC and TRC under various impact loading conditions is compelling. Indeed, a thorough understanding of their behavior enables the proper and safe design and application of mineral-bonded composites in the construction industry. Specifically, the rate dependent behavior of the composites and their constituents, i.e. matrix, reinforcement, and their bond, needs to be described.

In this context, appropriate and robust impact testing techniques at the material scale need to be developed encompassing a variety of loading conditions, i.e. compression, tension and shear. A gravitational Split-Hopkinson tension bar (SHTB) was developed within the framework of the Research Training Group (GRK2250) for material characterization of ductile mineral-bonded composites under impact tensile loading. Several aspects were considered for the design of the SHTB, such as the ductility of the composites of interest and the influence that mechanical adapters have on the measurements of the material properties.

The work at hand specifically focus on the material characterization of ductile composites under impact shear loading. To achieve this aim, a mechanical shear device, consisting of two adapters, was conceptualized and developed to be integrated into the gravitational SHTB. Several key aspects were considered in the design process of the shear device, such as (i) its influence on the wave propagation, (ii) the optimal specimen geometry to achieve a dominant shear fracture mode, (iii) the implementation of high-speed image acquisition, monitoring the fracture process during the experiment for further digital image correlation (DIC) analysis, and (iv) the suitability of the shear device in customary hydraulic testing machines as benchmark in quasi-static regime.

Parameters influencing the shear behavior of composites such as the shear span length, notches depth, and lateral confinement were investigated using experimental and/or numerical

techniques. An extensive experimental program of quasi-static and impact shear testing of various mineral-bonded composites was carried out using the developed shear device. The tested composites varied with respect to their constituent cement matrix, i.e. fully cement-based or sustainable limestone calcined clay cement and type of reinforcement, i.e. short fibers, continuous 2D- textiles, or 3D-reinforcement.

Kurzfassung

Neuartige mineralisch gebundene Verbundwerkstoffe wie z. B. dehnungshärtende zementbasierte Verbundwerkstoffe (SHCC) und textiltbewehrter Beton (TRC) sind vielversprechende Lösungen für die Verstärkung bestehender Gebäude und den Entwurf neuer Strukturen, die Stoßbelastungen widerstehen. Unter einachsiger Zugbelastung besitzen diese Verbundwerkstoffe eine hohe Dehnungsfähigkeit und Energieabsorptionsfähigkeit. SHCC und TRC weisen ein ausgeprägtes Verfestigungsverhalten auf, das aufgrund der Überbrückungsfähigkeit der Kurzfasern oder Endlosfasern durch Mehrfachrisse gekennzeichnet ist, so dass sie sich für die Anwendung als Schutzschicht für bestehende Strukturen eignen und die Widerstandsfähigkeit und Stoßsicherheit der gebauten Umwelt erheblich erhöhen. Darüber hinaus bieten mineralisch gebundene Verbundwerkstoffe attraktive Möglichkeiten zur Verbesserung der Nachhaltigkeitsstandards, z. B. durch die Verwendung von alternativen Bindemitteln wie kalziniertem Kalksteinton LC3.

Da Strukturelemente und Verstärkungsschichten bei einem Aufprall einer Vielzahl von gleichzeitigen lokalen und globalen Belastungsbedingungen ausgesetzt sind, ist die umfassende Charakterisierung von SHCC und TRC unter verschiedenen Aufprallbelastungen zwingend erforderlich. Ein umfassendes Verständnis ihres Verhaltens ermöglicht die sachgerechte und sichere Auslegung und Anwendung von mineralisch gebundenen Verbundwerkstoffen im Bauwesen. Insbesondere muss das geschwindigkeitsabhängige Verhalten der Verbundwerkstoffe und ihrer Bestandteile, d. h. der Matrix, der Verstärkung und ihres Verbundes, beschrieben werden.

In diesem Zusammenhang müssen geeignete und robuste Schlagprüfverfahren auf der Materialebene entwickelt werden, die eine Vielzahl von Belastungszuständen, d. h. Druck, Zug und Scherung, umfassen. Im Rahmen des Graduiertenkollegs (GRK2250) wurde ein Schwerkraft-Split-Hopkinson-Zugstab (SHTB) zur Materialcharakterisierung von duktilen mineralisch gebundenen Verbundwerkstoffen unter Schlagzugbelastung entwickelt. Bei der Konstruktion des SHTB wurden mehrere Aspekte berücksichtigt, wie die Duktilität der interessierenden Verbundwerkstoffe und der Einfluss mechanischer Adapter auf die Messung der Materialeigenschaften.

Die vorliegende Arbeit befasst sich speziell mit der Materialcharakterisierung von duktilen Verbundwerkstoffen unter Schlagscherbeanspruchung. Um dieses Ziel zu erreichen, wurde eine mechanische Schervorrichtung, bestehend aus zwei Adaptern, konzipiert und entwickelt, die in das Gravitations-SHTB integriert werden soll. Bei der Entwicklung der Schervorrichtung wurden mehrere Schlüsselaspekte berücksichtigt, wie z. B. (i) ihr Einfluss auf die Wellenausbreitung, (ii) die optimale Probengeometrie, um einen dominanten Scherbruchmodus zu erreichen, (iii) die Implementierung einer Hochgeschwindigkeits-Bilderfassung, die den Bruchprozess während des Experiments für die weitere digitale Bildkorrelationsanalyse (DIC)

überwacht, und (iv) die Eignung der Schervorrichtung in handelsüblichen hydraulischen Prüfmaschinen als Benchmark im quasi-statischen Regime.

Parameter, die das Scherverhalten von Verbundwerkstoffen beeinflussen, wie z. B. die Länge der Scherspanne, die Tiefe der Kerben und der seitliche Einschluss, wurden mit experimentellen und/oder numerischen Verfahren untersucht. Mit dem entwickelten Schergerät wurde ein umfangreiches Versuchsprogramm mit quasistatischen und schlagartigen Schertests an verschiedenen mineralisch gebundenen Verbundwerkstoffen durchgeführt. Die getesteten Verbundwerkstoffe unterschieden sich hinsichtlich ihrer Zementmatrix, d.h. vollständig zementbasiert oder nachhaltig kalksteinkalziniertes Tonzement, und der Art der Verstärkung, d.h. Kurzfasern, kontinuierliche 2D-Textilien oder 3D-Verstärkung.